

Pabrikasi dan Karakterisasi Sel Surya Tersensitisasi Dye Berbasis Elektroda Komposit $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ dan Elektrolit Polimer

Fabrication and Characterization Dye-Sensitized Solar Cell based on $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ Composit Electrode and Polymer Electrolyte

Irmansyah, Akhiruddin Maddu & Mahfuddin Zuhri
Departemen Fisika FMIPA Institut Pertanian Bogor

ABSTRACT

A solid-state dye-sensitized solar cell based on $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ composite electrode and polyethylene glycol (PEG) based electrolyte has been fabricated. The solar cell was formed in sandwich structure, which two electrodes sandwiching polymer electrolyte containing a redox couple (I^-/I_3^-). One of the electrode was $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ composite layer on TCO (transparent conducting oxide) coated glass substrate which sensitized with Ruthenium complex dye as electron donor, and the other electrode was a carbon sheet as a counter electrode. Active area of solar cell was $1.5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$. The solar cell was tested by irradiation with mercury lamp of 400 Watt with intensity of 30 mW/cm^2 at a distance of 30 cm and sunlight with intensity of 36 mW/cm^2 . The cell tested with mercury lamp result in an open circuit voltage (V_{OC}) of 420 mV, short circuit current (I_{SC}) of $52 \mu\text{A}$, maximum power (P_{max}) of $10.4 \mu\text{W}$, fill factor (FF) of 48% and energy conversion (η) of 0.023 %. On the other hand, the cell tested with sunlight source result in $V_{\text{OC}}=480 \text{ mV}$, $I_{\text{SC}}=48 \mu\text{A}$, $P_{\text{max}}=12.6 \mu\text{W}$, $\text{FF}=55\%$ and $\eta=0.023\%$.

Keywords: Dye-sensitized solar cell, $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ composite electrode, gel polymer solid electrolyte.

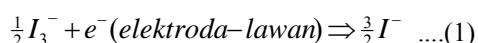
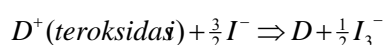
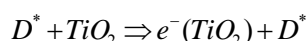
PENDAHULUAN

Sel surya nanokristal semikonduktor TiO_2 tersensitisasi dye dikembangkan sebagai konsep alternatif bagi piranti fotovoltaik konvensional berbasis *p-n* silikon. Sistem sel surya ini pertama kali dikembangkan oleh Grätzel *et al.* sehingga disebut juga sel Grätzel. Beberapa keuntungan sistem sel surya tersensitisasi dye ini adalah proses pabrikasinya lebih mudah dan sederhana tanpa menggunakan peralatan canggih dan mahal sehingga biaya pembuatannya dapat ditekan (Hao *et al.* 2004, Huang *et al.* 2007, de Freitas *et al.* 2007). Disamping itu, bahan dasarnya (seperti TiO_2) mudah diperoleh di pasaran dengan harga relatif murah. Efisiensi konversi yang dihasilkan dari sistem sel surya tersensitisasi dye telah mencapai 10-11% (Schmidt-Mende *et al.* 2006, Chiba *et al.* 2006). Namun demikian, sel surya ini memiliki kelemahan yaitu sel surya ini mempunyai stabilitas yang lebih rendah dibandingkan dengan sel surya konvensional berbasis silikon. Hal ini disebabkan karena penggunaan elektrolit cair yang mudah mengalami degradasi atau kebocoran (Huang *et al.* 2007, Jeong *et al.* 2004).

Sel surya TiO_2 tersensitisasi dye terdiri dari lapisan nanokristal TiO_2 berpori sebagai fotoanoda, dye sebagai sensitizer, elektrolit redoks dan elektroda lawan (katoda) yang diberi lapisan katalis (Li *et al.* 2006). Struktur sel surya tersensitisasi dye berbentuk struktur *sandwich*, dimana dua elektroda yaitu elektroda TiO_2 tersensitisasi dan elektroda lawan terkatalisasi mengapit elektrolit. Berbeda dengan sel surya *p-n* silikon, pada sel surya tersensitisasi dye, cahaya (foton) diserap oleh dye yang melekat (attached) pada permukaan partikel TiO_2 . Dalam hal ini Dye bertindak sebagai donor elektron dan berperan sebagai pompa fotoelektrokimia, dimana elektron dieksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi ketika menyerap cahaya, mirip dengan fungsi klorofil pada proses fotosintesis. Sedangkan lapisan TiO_2 bertindak sebagai akseptor atau kolektor elektron yang ditransfer dari dye teroksidasi. Elektrolit redoks, biasanya berupa pasangan iodide dan triiodide (I^-/I_3^-) bertindak sebagai mediator redoks sehingga dapat menghasilkan proses siklus di dalam sel (Smestad & Grätzel 1998).

Prinsip kerja sel surya TiO_2 tersensitisasi dye ditunjukkan secara skematik pada Gambar 1. Ketika foton dengan energi lebih besar daripada jarak level HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) dan level LUMO (Lowest Unoccupied

Molecular Orbital) pada molekul *dye*, mengakibatkan elektron tereksitasi ke level HOMO dan menghasilkan *dye* teroksidasi (D^*) pada level LUMO. Elektron-elektron tersebut terinjeksi ke pita konduksi TiO_2 dan mengalir menuju rangkaian luar sehingga menghasilkan arus listrik. *Dye* yang teroksidasi tadi mengakibatkan reaksi oksidasi iodide (I^-) menjadi triiodida (I_3^-) di dalam elektrolit. Elektron-elektron selanjutnya masuk kembali ke dalam sel melalui elektroda lawan dan menginduksi reaksi reduksi triiodida (I_3^-) menjadi iodida (I^-) di dalam sel. Secara keseluruhan, prinsip TiO_2 tersensitisasi *dye* melibatkan beberapa reaksi kimia secara berurutan dan berkesinambungan serta reversibel hingga membentuk siklus, oleh karena itu digunakan elektrolit redoks. Reaksi-reaksi kimia yang terjadi secara berurutan di dalam sel sebagai berikut (Smestad & Grätzel, 1998):



Tegangan yang dihasilkan oleh sel surya tersensitisasi *dye* berasal dari perbedaan tingkat energi konduksi elektroda semikonduktor (TiO_2) dan potensial elektrokimia pasangan kopel redoks (I^-/I_3^-). Sedangkan arus yang dihasilkan terkait langsung dengan jumlah foton yang terlibat dalam proses konversi dan bergantung pada intensitas penyinaran serta kinerja *dye* yang digunakan (Smestad & Grätzel, 1998) (Gambar 1)

Hingga saat ini berbagai variasi optimasi dilakukan oleh banyak kelompok peneliti untuk meningkatkan efisiensi konversi maupun stabilitas kinerja sel surya tersensitisasi *dye*. Oleh karena itu berbagai rekayasa telah dilakukan diantaranya dengan memodifikasi elektroda TiO_2 dan elektrolit serta *dye* yang digunakan. Untuk memperbaiki stabilitas sel misalnya, para peneliti mengembangkan sel dengan elektrolit padat sebagai pengganti elektrolit cair yang mudah degradasi atau bocor, diantaranya adalah elektrolit berbasis polimer yang mengandung kopel redoks

(Hao *et al.* 2004, Huang *et al.* 2007, Jeong *et al.* 2004, Joseph *et al.* 2006, Wang *et al.* 2004) atau elektrolit berbasis bahan konduktor *hole* (Schmidt-Mende *et al.* 2006, Lancelle-Beltran *et al.* 2006, Senadeera *et al.* 2005). Sedangkan untuk mengoptimalkan proses transfer dan pemisahan muatan yang mengurangi rekombinasi prematur di dalam sel, dilakukan modifikasi elektroda TiO_2 misalnya dalam bentuk komposit seperti $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (Nguyen *et al.* 2007), $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Zhang *et al.* 2003) dan $\text{TiO}_2/\text{CaCO}_3$ (Lee *et al.* 2003). Modifikasi elektroda TiO_2 juga dapat dilakukan dengan memasukkan atau melapisi partikel TiO_2 dengan bahan oksida logam yang memiliki celah pita energi lebar. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan aktif elektroda partikel semikonduktor sehingga lebih banyak molekul *dye* yang dapat teradsorpsi di dalam elektroda (Kang *et al.* 2007).

Dalam penelitian ini sel surya yang dikembangkan menggunakan elektroda TiO_2 termodifikasi SnO_2 membentuk komposit. Sedangkan untuk mengurangi terjadinya degradasi elektrolit, digunakan larutan iodida/triiodida (I^-/I_3^-) sebagai kopel redoks yang diinsersi ke dalam gel polimer PEG (polyethylene glycol) sehingga dapat menghindari terjadinya kebocoran. Elektrolit gel polimer ini juga bertindak sebagai perekat kedua elektroda, yaitu fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ tersensitisasi *dye* dan elektroda lawan (katoda) berupa lempeng karbon.

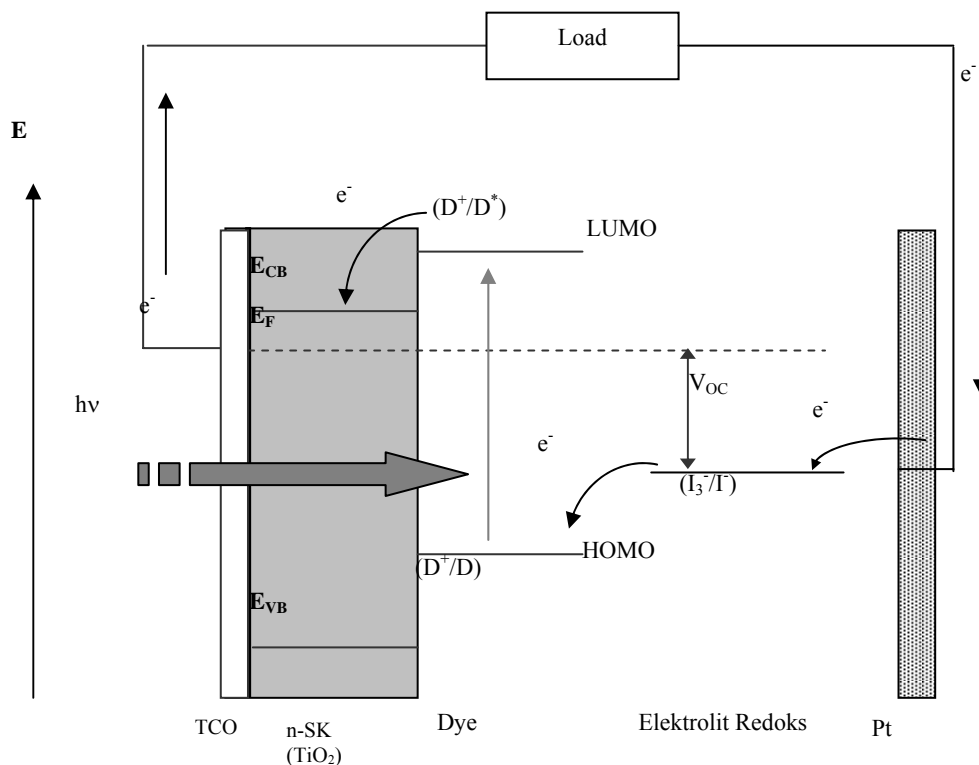
METODE

Bahan dan alat

Bahan-bahan yang digunakan adalah bubuk TiO_2 nanopartikel (Degussa P25), bubuk SnO_2 , asetil aseton (Merck), Triton X-100 (Merck), kloroform, polietilen glikol 4000 (PEG 4000), *dye* Ruthenium kompleks 535 (Solaronix), elektrolit yang mengandung kopel iodida/triiodida (Iodolyte, Solaronix), etanol dan propanol. Sedangkan peralatan yang digunakan adalah voltmeter digital, amperemeter digital, reostat 1 M Ω , pengaduk magnet, neraca digital, batangan gelas, *stirring hot place, furnace*, lampu merkuri 400 Watt, dan spektrofotometer UV-VIS.

Pembuatan sel surya

Elektrolit padat yang dipergunakan berbasis polimer PEG (polyethylene glycol) dengan berat molekul (BM) 4000. Mula-mula sebanyak 7 g PEG dilarutkan dengan 25 ml kloroform hingga membentuk gel, kemudian ke dalam larutan tersebut dimasukkan larutan Iodolyte (Solaronix) yang mengandung kopel redoks I^-/I_3^- . Campuran tersebut diaduk dengan pengaduk magnetik sambil dipanaskan pada suhu 80°C selama satu jam hingga diperoleh campuran yang homogen.



Gambar 1. Skema prinsip sel surya fotoelektrokimia tersensitisasi dye.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis XRD elektroda TiO₂/SnO₂

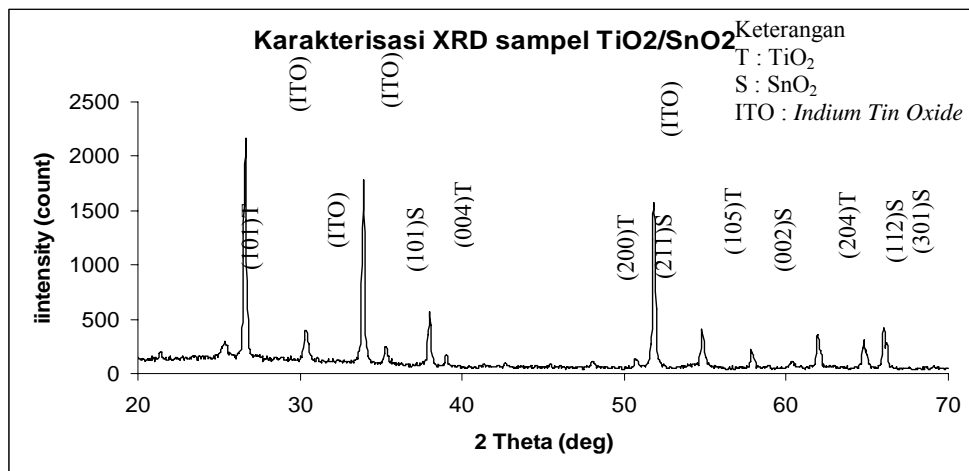
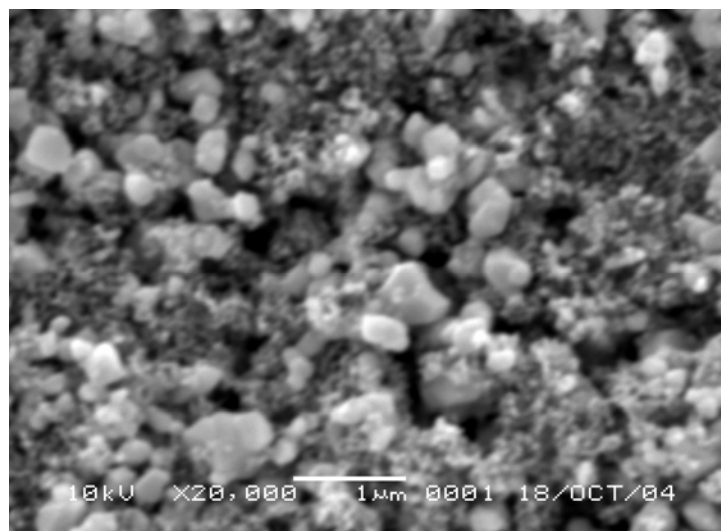
Sebelum dipabrikasi menjadi sel surya, elektroda komposit TiO₂/SnO₂ dikarakterisasi dengan difraksi sinar-X (XRD). Difraktogram yang diperoleh diidentifikasi puncak-puncak karakteristik TiO₂ dan SnO₂. Karakterisasi XRD dilakukan di PTBIN Badan Tenaga Nuklir Nasioanal (BATAN), Serpong, Tangerang. Sampel dikarakterisasi menggunakan alat XD-610 SHIMADZU dengan sumber Cu pada tegangan 30kV dan arus 30mA.

Hasil karakterisasi XRD elektroda TiO₂/SnO₂ diperlihatkan dalam bentuk difraktogram (Gambar 2), yang menunjukkan puncak-puncak karakteristik TiO₂, SnO₂ dan substrat ITO. Tampak pada difraktogram puncak-puncak karakteristik TiO₂ pada sudut $2\theta = 25,38; 38,01; 54,80;$ dan $61,95$. Puncak-puncak karakteristik SnO₂ muncul pada $2\theta = 35,24; 51,82; 57,84;$ $64,77;$ dan $66,02$, sedangkan puncak-puncak substrat ITO muncul pada $2\theta =$

$26,63; 30,37;$ dan $33,89$. Dari puncak-puncak yang muncul pada difraktogram tampak bahwa komposit TiO₂/SnO₂ telah terbentuk, sedangkan puncak-puncak karakteristik substrat ITO muncul dominan sekalipun tertutupi lapisan komposit TiO₂/SnO₂.

Morfologi elektroda TiO₂/SnO₂

Morfologi permukaan elektroda komposit TiO₂/SnO₂ SEM, dapat dilihat pada Gambar 3. Pada foto SEM tersebut tampak morfologi komposit TiO₂/SnO₂ yang sangat berpori seperti yang diharapkan. Berdasarkan foto SEM, butiran-butiran yang lebih besar merupakan partikel-partikel TiO₂ sebagai matriks dan butiran-butiran halus adalah partikel-partikel SnO₂ sebagai *filler* yang membentuk sistem komposit. Struktur yang sangat berpori ini akan mengakibatkan semakin banyak molekul *dye* yang menempel pada permukaan partikel TiO₂ dan SnO₂, hal ini menyebabkan semakin banyak elektron yang dapat tereksitasi ketika *dye* pada permukaan partikel TiO₂/SnO₂ menyerap cahaya (foton). Sistem komposit ini diharapkan mengurangi rekombinasi prematur elektron di dalam sel surya.

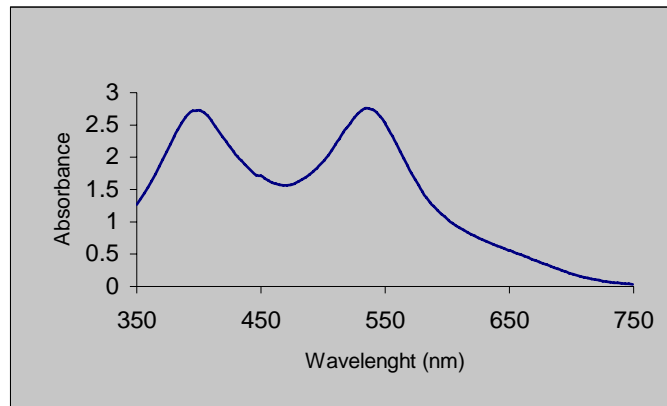
Gambar 2. Hasil karakterisasi XRD elektroda $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$.Gambar 3. Morfologi permukaan elektroda $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ dengan SEM.

Karakteristik absorpsi dye Ruthenium kompleks

Sebelum digunakan sebagai sensitizer, dye Ruthenium 535 (Solaronix, Switzerland), terlebih dahulu dikarakterisasi spektrum absorpsinya menggunakan Spektrofotometer UV-Vis. Absorbansi diukur pada rentang panjang gelombang 350 nm – 750 nm. Spektrum absorbansi larutan dye dengan konsentrasi 5×10^{-4} M di dalam etanol menunjukkan dua pita spesifik, yaitu pita biru dengan puncak maksimum pada sekitar 400 nm dan pita hijau dengan maksimum pada sekitar 535 nm (Gambar 4). Tampak

bahwa kedua pita absorpsi memiliki bentuk dan lebar hampir sama yang menyatakan bahwa dye memiliki dua level transisi yang berbeda dengan selisih energi berbeda.

Dengan dua pita absorpsi yang lebar tersebut maka dapat dihasilkan penyerapan foton yang lebih banyak sehingga efisiensi konversi sel surya semakin meningkat. Semakin lebar spektra absorpsi dye, maka semakin banyak frekuensi cahaya yang dapat diserap oleh sel surya. Nilai efisiensi konversi sel surya juga bergantung pada panjang gelombang cahaya yang diabsorpsi. Kedua pita absorpsi dye berada dalam rentang cahaya tampak sebagai daerah kerja sel surya.



Gambar 4. Spektrum absorbs dye Ruthenium 535.

Karakterisasi arus-tegangan sel surya

Sistem sel surya tersensitisasi dye yang dipabrikasi menggunakan elektroda komposit $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ dan elektrolit padat berbasis polimer polietilen glikol (PEG). Elektrolit padat berbasis polimer PEG ini selain berfungsi sebagai mediator kopel redoks iodida/triiodida, juga berfungsi sebagai perekat dua elektroda (komposite $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ dan lempeng karbon) yang dapat mengurangi kebocoran dan degradasi sel sehingga meningkatkan stabilitasnya.

Untuk mengetahui kinerja sel surya dilakukan pengukuran karakteristik arus-tegangan (I-V) pada kondisi tersinari dengan menggunakan sumber cahaya lampu merkuri 400 watt dan cahaya matahari. Luas penampang sel surya adalah $1,5 \text{ cm}^2$. Pada pengujian dengan sumber cahaya lampu merkuri 400 watt, jarak antara sel surya dengan lampu adalah 30 cm dengan intensitas 30 mW/cm^2 (diukur dengan Radiometer). Sedangkan pengujian dengan sumber cahaya matahari dilakukan pada pukul 11.00 – 12.00 dengan intensitas sebesar 36 mW/cm^2 (diukur dengan Radiometer).

Hasil karakterisasi arus-tegangan sel surya ditunjukkan pada Gambar 5 untuk sumber cahaya lampu merkuri, sedangkan untuk sumber cahaya matahari ditunjukkan pada Gambar 6. Kedua kurva arus-tegangan yang diperoleh menunjukkan pola yang cukup ideal seperti ditunjukkan oleh kelengkungan kurva yang cukup signifikan. Tampak bahwa kurva untuk sumber cahaya matahari menunjukkan karakteristik yang lebih ideal dengan kelengkungan yang lebih

besar dibandingkan untuk sumber cahaya lampu merkuri.

Dari kurva-kurva arus-tegangan (I-V) yang diperoleh dapat ditentukan parameter-parameter keluaran dari sel surya, yaitu arus rangkaian pendek (I_{sc}), tegangan rangkaian buka (V_{oc}), arus maksimum (I_{max}), tegangan maksimum (V_{max}), daya maksimum (P_{max}), fill factor (FF) dan efisiensi konversi (η). Efisiensi konversi sel surya dihitung menurut hubungan:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2)$$

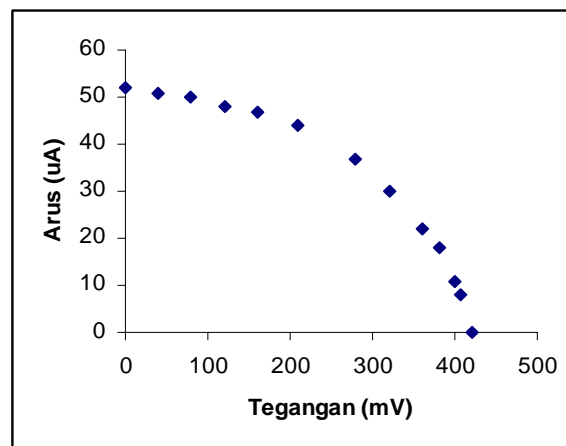
P_{max} adalah daya maksimum yang dihasilkan sel surya dan P_{in} adalah daya sumber cahaya yang digunakan. Daya maksimum diberikan oleh hubungan :

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad \dots\dots\dots(3)$$

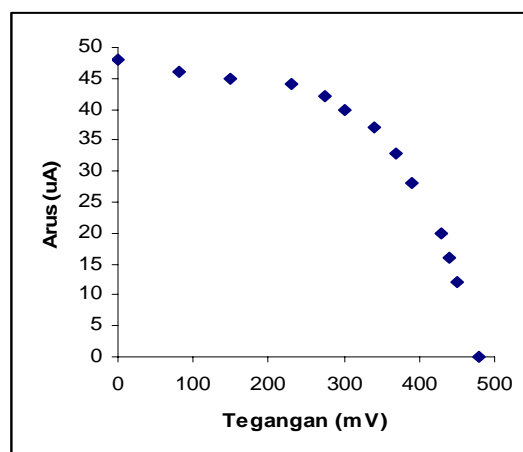
dengan fill factor (FF) diberikan oleh

$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

Berdasarkan hasil pengukuran nilai arus dan tegangan yang telah dibuat dalam bentuk kurva arus-tegangan (I-V), diperoleh parameter-parameter keluaran sel surya seperti dirangkum di dalam Tabel 1. Dengan dua kondisi pengujian yang dilakukan, yaitu menggunakan sumber cahaya lampu merkuri dan cahaya matahari, diperoleh karakteristik yang tidak terlalu berbeda seperti ditunjukkan oleh nilai-nilai parameter keluaran sel surya yang tidak jauh berbeda. Efisiensi konversi sel surya pada dua kondisi pengujian adalah sama yaitu 0,023 %.



Gambar 5. Kurva arus-tegangan sel surya dengan lampu merkuri.



Gambar 6. Kurva arus-tegangan sel surya dengan cahaya matahari.

Tabel 1. Parameter-parameter sel surya $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ tersensitisasi *dye*.

Karakterisasi I – V	Sumber Cahaya	
	Lampu	Matahari
Intensitas cahaya (mW/cm^2)	30	36
I_{maks} (μA)	37	37
V_{maks} (V)	0,280	0,340
P_{maks} (μW)	10,4	12,6
V_{oc} (V)	0,420	0,480
I_{sc} (μA)	52	48
Fill Factor (%)	48	55
Efisiensi (%)	0,023	0,023

Tegangan rangkaian buka (V_{oc}) sel surya adalah 420 mV dan 480 mV, masing-masing untuk pengujian dengan lampu merkuri dan cahaya matahari. Nilai tegangan ini cukup signifikan untuk prototipe sel surya skala laboratorium. Tegangan ini berasal dari perbedaan potensial antara level konduksi elektroda semikonduktor sistem komposit TiO_2/SnO_2 dengan potensial elektrokimia kopel redoks I/I_3 (Smestad & Grätzel 1998). Sedangkan tegangan maksimum yang diperoleh masing-masing adalah 280 mV dan 340 mV.

Arus keluaran sel surya (disebut juga arus foto) masih sangat rendah yaitu dalam orde mikrometer (μA). Arus rangkaian pendek (I_{sc}) adalah 52 μA untuk sumber cahaya lampu merkuri dan 48 μA untuk sumber cahaya matahari. Sedangkan arus maksimum (I_{max}) adalah 37 μA untuk kedua kondisi pengujian. Kecilnya arus keluaran yang dihasilkan salah satunya disebabkan oleh resistansi lapisan elektroda komposit TiO_2/SnO_2 yang besar. Dari hasil pengukuran diketahui nilai resistansi lapisan TiO_2/SnO_2 adalah dalam orde mega ohm ($M\Omega$). Dengan nilai resistansi yang sangat besar ini mengakibatkan elektron yang diinjeksi dari *dye* mengalami hambatan yang sangat besar di dalam lapisan komposit TiO_2/SnO_2 sehingga jumlah elektron yang mengalir ke rangkaian luar menjadi kecil, akibatnya arus yang dihasilkan juga kecil. Penyebab lainnya adalah belum optimalnya fungsi *dye* dalam pembangkitan dan injeksi elektron ke lapisan elektroda TiO_2/SnO_2 , karena jumlah (konsentrasi) *dye* yang menempel (*attach*) pada permukaan partikel semikonduktor TiO_2/SnO_2 sangat kecil sehingga jumlah elektron yang dibangkitkan juga sedikit. Kemungkinan lain karena jerapan (adsorpsi) *dye* pada permukaan partikel TiO_2/SnO_2 tidak maksimal sehingga proses tranfer elektron dari *dye* teroksidasi tidak optimal. Kecilnya arus keluaran yang dihasilkan mengakibatkan kinerja (performa) sel surya kurang optimal, khususnya konversi energinya masih sangat kecil.

Karena arus keluaran yang masih sangat kecil, daya maksimum keluaran juga kecil yaitu dalam orde mikro watt (μW) jika dibandingkan dengan sel surya ideal yaitu dalam orde mikro watt (μW) jika dibandingkan dengan sel surya ideal yaitu

dalam orde milli Watt (mW). Namun demikian, nilai faktor pengisian (fill factor) sel surya cukup baik, khususnya pada pengujian dengan sumber cahaya matahari yaitu 55%. Ini bersesuaian dengan bentuk kurva arus-tegangan (I-V) yang cukup ideal. Untuk meningkatkan nilai *fill factor* ini salah satunya dengan mengurangi nilai resistansi sel surya, khususnya lapisan elektroda semikonduktor.

KESIMPULAN

Telah dipabrikasi sel surya fotoelektrokimia berbasis elektroda komposit TiO_2/SnO_2 tersensitisasi *dye* dengan elektrolit padat menggunakan polimer mengandung kopel redoks I/I_3 . Hasil karakterisasi arus-tegangan sel surya memperlihatkan kemampuan konversi energi cahaya menjadi energi listrik. Parameter keluaran sel surya diperoleh nilai arus rangkaian pendek (I_{sc}) 52 μA , tegangan rangkaian buka (V_{oc}) 420 mV, daya maksimum (V_{maks}) 10,4 μW , fill factor (FF) 48% dan efisiensi konversi 0,023% untuk pengujian dengan sumber cahaya lampu merkuri intensitas 30mW/cm². Sedangkan pada pengujian dengan sumber cahaya matahari diperoleh nilai arus rangkaian pendek (I_{sc}) 48 μA , tegangan rangkaian buka (V_{oc}) 480 mV, daya maksimum (V_{maks}) 12,6 μW , fill factor (FF) 55% dan efisiensi konversi 0,023%. Kecilnya arus keluaran ini secara keseluruhan mengurangi kinerja (performa) sel surya.

DAFTAR PUSTAKA

- Chiba Y, Islam A, Watanabe Y, Komiya R, Koide N & Han L. 2006. Dye-Sensitized Solar Cell with Conversion Efficiency of 11.1%. *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**:L638-L640
- de Freitas JN, Nogueira V, Ito BI, Soto-Oviedo MA, Longo C, De Paoli MA & Nogueira AF. 2006. Dye-Sensitized Solar Cells and Solar Module Using Polymer Electrolytes: Stability and Performance Investigation. *Intern'l. J. Photoenergy* **2006**:1-6.
- Hao SC, Wu JH, Fan LQ, Huang YF, Lin JM & Wei YL. 2004. The Influence of Acid Treatment of TiO_2 Porous Film Electrode on Photoelectric Performance of Dye-Sensitized Solar Cell. *Solar Energy* **76**: 745-750.
- Huang ML, Yang HX, Wu JH, Lin JM, Lan Z, Li PJ, Hao SC, Han P & Jiang QW. 2007. Preparation of a Novel Polymer Gel Electrolyte Gel based on N-methyl-quinoline Iodide and Its Application in Quasi-Solid-State Dye-Sensitized Solar Cell. *J. Sol-Gel Sci. Techn.* **42** (27): 65-70.

- Jeong Y-B, Lee D-Y, Song J-S, Kim S-S, Sung Y-U & Kim D-W. 2004. A Solid-State Dye-Sensitized Solar Cell Constructed Using a gel Polymer Electrolyte. *J. Ind. End. Chem.* **10(4)**:499-503.
- Joseph J, Son KM, Vittal R, Lee W & Kim KJ. 2006. Quasi-Solid-State Dye Sensitized Solar Cells with Siloxane Poly(ethylene glycol) Hybrid Gel Electrolyte. *Semicond. Sci. Technol.* **21**:697-701.
- Kang SH, Kim J-Y, Kim Y-K & Sung Y-E. 2007. Effect of the Incorporation of Carbon Powder into Nanostructured TiO₂ Film for Dye-Sensitized Solar Cell. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* **186**:234-241
- Lancelle-Beltran E, Prene P, Boscher C, Belleville P, Buvet P & Sanchez C. 2006. *Advanced Materials* **18**:2579-2582.
- Lee SW, Kim JY, Hong KS, Junk HS, Lee J-K & Shin H. 2006. Enhancement of the Photoelectric Performance of Dye-Sensitized Solar Cell by Using a CaCO₃-Coated TiO₂ Nanoparticle Film as An Electrode. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* **90(15)**:2405-2412
- Li B, Wang L, Kang B, Wang P & Qiu Y. 2006. Review of Recent Progress in Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **90**:549-573
- Nguyen T-V, Lee H-C, Khan MA & Yang O-B. 2007. Electrodeposition of TiO₂/SiO₂ Nanocomposite for Dye-Sensitized Solar Cell. *Solar Energy* **81(4)**:529.
- Senadeera GKR, Kobayashi S, Kitamura T, Wada Y & Yanagida Y. 2005. Versatile Preparation Method for Mesoporous TiO₂ Electrode Suitable for Solid-State Dye-Sensitized Photocells. *Bull. Mater. Sci.* **28**:635-641.
- Schmidt-Mende L & Grätzel M. 2006. Pore-Filling and Its Effect on The Efficiency of Solid-State Dye-Sensitized Solar Cell. *Thin Solid Films* **500**:296-301.
- Smestad GP & Grätzel M. 1998. Demonstrating Electron and Nanotechnology. *J. Chem.Educ.* **75** (6):1-6.
- Wang G, Zhou X, Li M, Zhang J, Kang J, Lin Y, Fang S & Xiao X. 2004. Gel Polymer Electrolytes based on Polyacrylonitrile and a Novel Quaternary Ammonium Salt for Dye-Sensitized Solar Cells. *Mater. Res. Bull.* **39**:2113-2118.
- Zhang X-T, Susanto I, Taguchi T, Tokuhiko K, Meng G-B, Rao TN, Fujishima A, Watanabe H, Nakamori T & Urugami M. 2003. Al₂O₃-Coated Nanoporous TiO₂ Electrode for Solid-State Dye-Sensitized Solar Cell. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* **80(3)**:315-326.